

超伝導高周波加速空洞の電子・陽電子衝突リングへの応用

著者	鈴木 敏司
号	1151
発行年	1990
URL	http://hdl.handle.net/10097/25075

氏名・(本籍)	すずきとしじ 鈴 木 敏 司
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 1151 号
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 28 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 原子核理学専攻
学位論文題目	超伝導高周波加速空洞の電子・陽電子衝突リングへの応用
論文審査委員	(主査) 教 授 庄 田 勝 房 教 授 小 島 融 三 教 授 菅 原 真 澄

論 文 目 次

第一章	序論
第二章	超伝導空洞の構成
第三章	入射蓄積リングにおけるビームテスト
第四章	縦測定
第五章	横測定
第六章	主リングへの応用
第七章	長期運転による性能変化
第八章	まとめと今後の展望
	謝 辞
	参考文献
	Appendix

論文内容要旨

序

高エネルギー物理学研究所では電子・陽電子衝突円形加速器を用いた TRISTAN 計画が行なわれている。加速空洞において必要とされる高周波電力は、ビーム加速に用いられる電力と加速空洞の空洞壁で消費される電力の和である。高エネルギー電子は円形加速器ではシンクロトロン放射によってエネルギーを失う。それを補うためには、ビームエネルギーの 4 乗に比例した加速電圧が必要となる。一方、空洞壁で消費される電力（空洞損失）は加速電圧の 2 乗に比例するため、ビームエネルギーの 8 乗に比例する。よって、高エネルギービームを得ようとすると、空洞損失が急激に増加し、高周波電力供給と空洞の冷却とに問題が生じる。加速空洞を超伝導化すると、空洞損失は常伝導空洞のそれに比べて 10^{-4} 以下になり、加速電界の増強が期待できる。しかし、空洞性能が表面の状態に非常に敏感であるという欠点があり、超伝導破壊によって加速電界が制限され、実用化が困難であった。TRISTAN 加速器では1988～1989年にかけて、主リングにある 4 ヶ所の加速部のうち 1 ヶ所に超伝導空洞32台が設置された。

超伝導空洞を実用化するためには大きく分けて 2 つの問題点がある。1 つに高性能空洞をいかにして大量に安定に製作するかということであり、もう 1 つは安定な動作が可能かということである。後者はさらに空洞の高周波制御と、長期間にわたる性能の維持の 2 つに分けられる。ここで、空洞損失に反比例する量として無負荷 Q 値を導入すると、TRISTAN 超伝導空洞の性能の目標値は運転加速電界5MV/m 以上、無負荷 Q 値は 2×10^9 以上である。本研究では、超伝導空洞の建設及び運転を通して、空洞性能、高周波制御及び性能の長期安定性についてまとめる。

空洞性能

超伝導空洞で加速電界を制限する要因としては熱-磁氣的超伝導破壊、マルチパクティング、電界放出電子がある。これらは材料の熱伝導率を上げることや、空洞形状の最適化、表面処理法の進歩により克服されつつある。空洞単体の性能試験（縦測定）で得られた最大加速電界の分布を図 1 に示す。1 台を除いて目標加速電界の5MV/m を越え、空洞全数の 6 割が10MV/m に達した。周辺部品を実装した最終状態では最大加速電界は図 2 の分布となるが、単体性能に比べて約30%の低下が見られる。周辺部品を実装するために空洞の真空が破られるので、低下の原因として空洞内面を 1 気圧の窒素及び空気にさらすこと、あるいは組み立て時の塵の侵入が考えられる。単空洞を用いた試験により、窒素及び空気はほとんど影響がないことが確認された。よって、性能の低下は組み立て時の塵の侵入によるものと思われる。

高周波制御

空洞電圧は外部高周波源（クライストロン等）によって励振される電圧と、ビームによって

誘起される電圧のベクトル和である。超伝導空洞では、ビーム負荷に適合するように負荷 Q 値（カプラーも含めた Q 値）を 10^6 としているが、常伝導空洞の負荷 Q 値に比べて70倍も高く、ビーム誘起電圧も大きい。その結果として、次の2つの問題点が予想される。1つはロビンソンの安定条件によって蓄積電流値が制限されることであり、もう1つはビーム入射時等の過渡状態において制御ループの負担が大きくなることである。

電力効率を良くするために、空洞入力電圧と空洞電圧の位相が等しくなるように制御するが、ビーム負荷の影響を小さくするために、ここにオフセットをかけることを考える。これをチューニング・アングル・オフセットと呼ぶ。

ロビンソンの安定条件による制限を調べるために、入射蓄積リングで行なわれたビームテストでは加速電圧とチューニング・アングル・オフセットを変化させながら最大蓄積電流を測定した。結果をロビンソンの安定条件の理論値と共に図3に示す。実測値と理論値は良く一致している。最大蓄積電流を増加させるためには数十度オフセットをかけることが特に有効である。

次に主リングにおける運転を考える。超伝導空洞を1MV/mで、常伝導空洞による加速電圧を23MVにすると、リング設計値の16mAを蓄積するためには -20° のオフセットが必要であることが計算により示された。

高周波制御は、空洞電圧が一定の大きさと位相を保持できるように空洞入力電圧を制御している。ビーム誘起電圧が大きくなると、空洞入力電圧を変化させても空洞電圧が変化なくなり、不安定な状態が生じる。チューニング・アングルにオフセットをかけると、ビーム誘起電圧が小さくなる。そのため、入射時の過渡状態の制御ループへの負担を軽くするためにもオフセットをかけることが有効である。

オフセットをかけると、多大な空洞入力電圧が必要になるという欠点がある。また、衝突エネルギー時には加速電圧が高いため、オフセットを加えなくても十分な量（40mA以上）の電流が蓄積可能である。よって、ロビンソンの安定条件と過渡状態における制御ループへの負担減を考慮して、入射時には -30° 、衝突エネルギー時には -5° のオフセットをプログラム制御によりかけることにした。

ビーム負荷が大きく、また、1台のクライストロンで4台の空洞を駆動していることから、空洞間に位相差があると、空洞電圧にアンバランスが生じる。これを防ぐためには、空洞間の位相は精度良く合わせ必要がある。

性能の長期安定性

空洞は液体ヘリウム温度という極低温に冷却されているため、主にリング内の残留ガスが表面に凝縮する。表面状態に敏感な超伝導空洞は、このガス凝縮によって性能が低下する可能性がある。そこで、定期的に無負荷 Q 値と最大加速電界の測定が行なわれた。結果を図4に示す。無負荷 Q 値の測定は冷媒として用いている液体ヘリウムの消費量から求めたものであり、20～30%の誤差がある。誤差の範囲で無負荷 Q 値と最大加速電界の低下はない。ただし、例外

的に劣化の見られるものがあるが、この空洞は電界放出電子が多いことから塵が侵入したものと思われる。

ガス凝縮量を調べるために、ウォームアップ時のガス放出量を測定した。80日の冷却期間の後では気体分子数にして 10^{20} 個の放出量があった。この量を空洞表面に凝縮した厚さに直すと、平均して分子層2層である。

運転中に高次モードカプラーの異常な動作が発見された。高次モードカプラーとはビームによって空洞内に誘起される加速モード以外の高調波を外に取り出すためのものである。このカプラーは加速モードが出力されない様にノッチ・フィルター構造を有しているが、それにもかかわらが加速モードが100W以上出力される場合があった。高次モードカプラーの出力と表面温度を測定した結果を図5に示す。出力異常時に温度上昇が見られることから、フィルター内部が超伝導破壊を起こしている可能性が高い。また、運転周波数を下げると、出力も低下することから、フィルターの共振周波数が低い方にずれていることがわかった。空洞エージング初期（加速電界 $<1\text{MV/m}$ ）においては、カプラーから周期的な出力が生じた。これらのことから、出力異常を起こす機構は、フィルター部のマルチパッキングが引き金になって超伝導破壊を起こし、高周波損失の増加による熱膨張によってフィルター特性が変化することと判明した。高次モード取り出しケーブルのN型コネクタが焼損した原因は、この特性変化により大電力の加速モードが出力されたことにある。根本的な対策としてはフィルター内部が十分冷却されるように改造することが必要である。

まとめ

空洞の製作技術と高周波制御技術の確立により、超伝導空洞の大規模な応用が可能になった。

1) 空洞単体の性能試験では、 5MV/m の加速電界を達成することは可能であり、 10MV/m 以上の電界が得られた空洞が全体数の6割を占めた。しかし、周辺部品を装着した最終的な状態では同等の性能は得られず、 7MV/m を中心とした分布になる。原因の1つに組み立て時における塵の侵入があり、組み立て方法に改善の余地がある。

2) 超伝導空洞の負荷Q値は常伝導空洞のそれに比べて高いため、ロビンソンの安定条件によって蓄積電流が制限されることが判明した。また、入射時の過渡状態では制御ループへの負担が大きい。これらの問題点は入射時に -30° のチューニング・アングル・オフセットをかけることにより解決できることがわかり、安定な制御が行なえた。

3) 設置してから1年あまり経過したが、無負荷Q値、最大加速電界の低下は見られない。80日間の冷却期間におけるガス凝縮量は平均して分子層2層である。したがって超伝導空洞は長期の運転に耐え得ることが示された。例外的に運転開始後間もなく著しい劣化が生じたものがある。これは塵の侵入によるものと思われる。性能回復のためには、ヘリウム・イオンによる表面洗浄法が有効であることが別の実験によって明らかにされており、これを試みるのも1つの方法である。

残された問題点として、カプラー及びその他の周辺部品の改良がある。高次モードカプラー異常動作に関しては、出力を監視して加速モードが出力された場合には保護回路を働かすことによって対処している。

超伝導空洞の蓄積リングへの大規模な応用は TRISTAN が世界初であり、超伝導空洞によって得られた加速電圧も現在世界最高を誇っている。

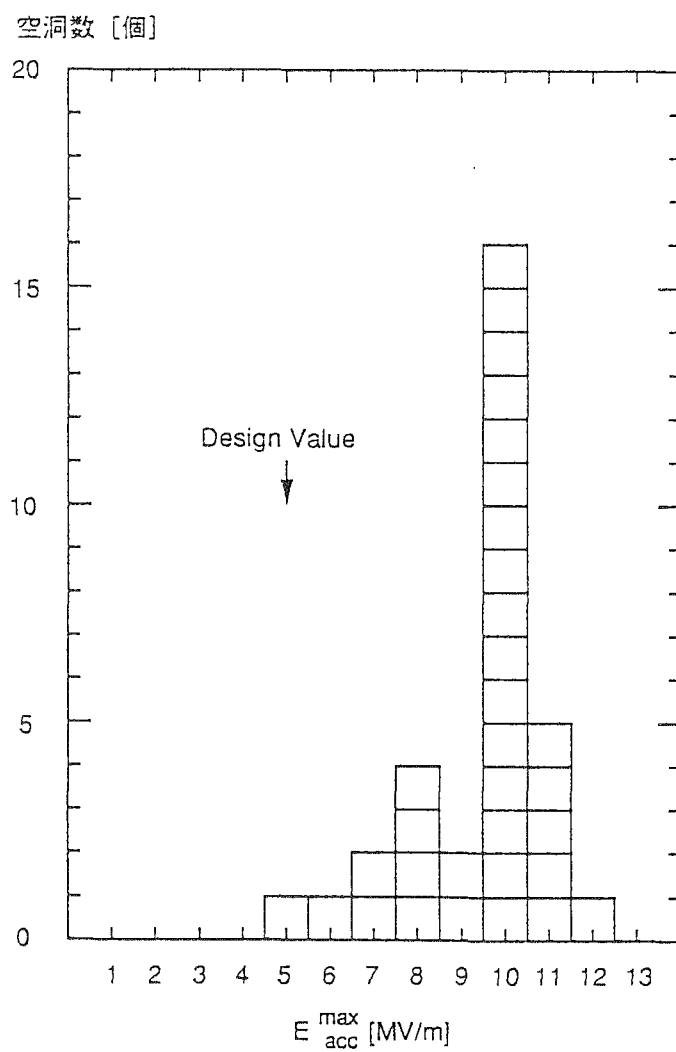


図1 空洞単体の性能試験における最大加速電界の分布。

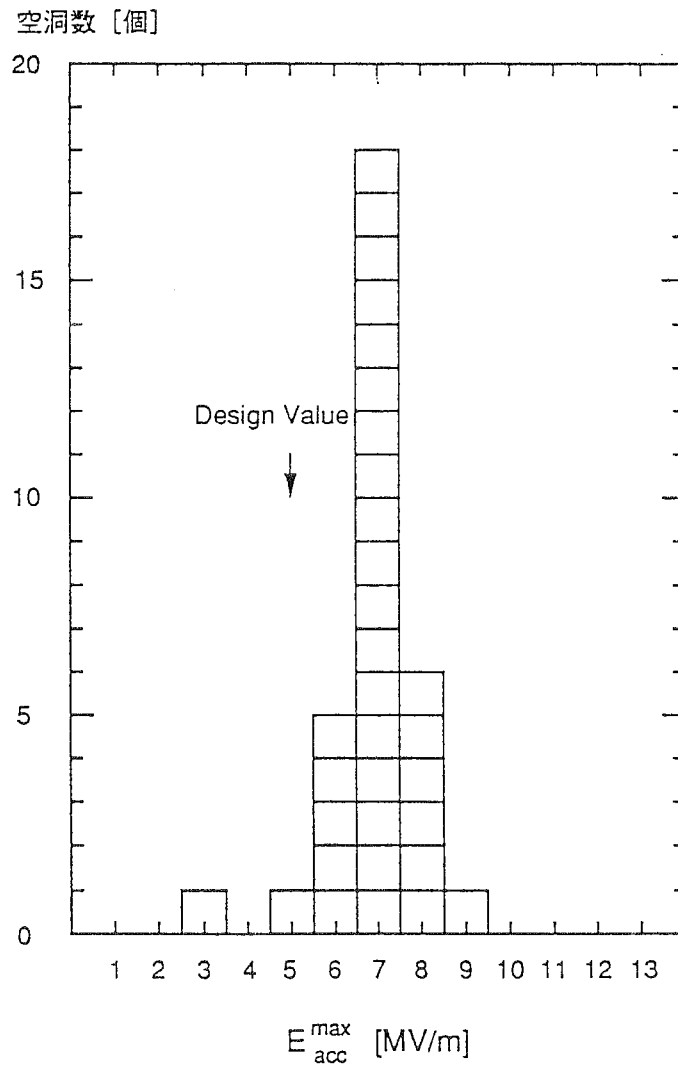


図2 周辺部品を装着した最終状態での最大加速電界の分布。

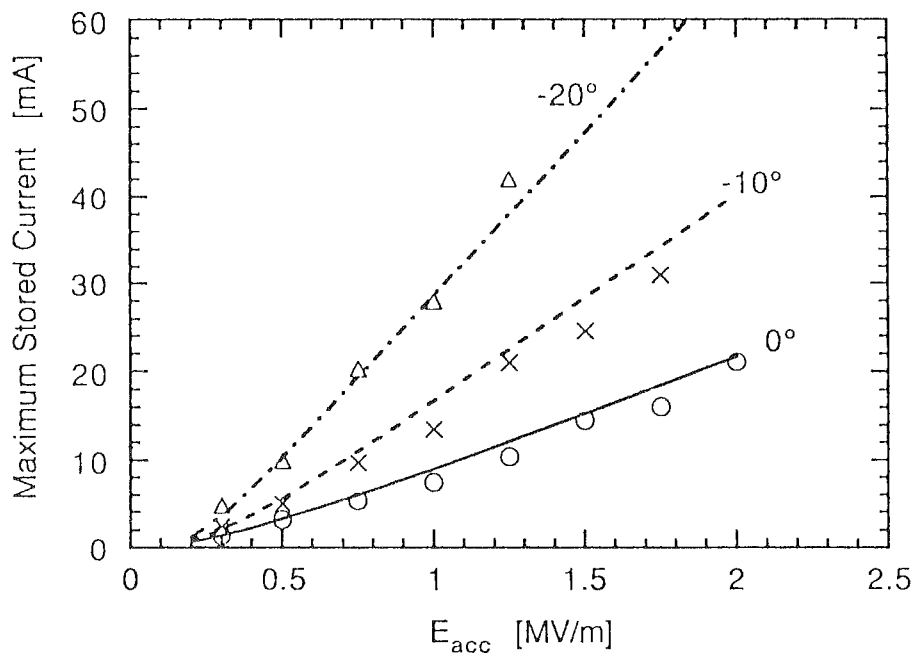


図3 入射蓄積リングにおける最大蓄積電流の実測値と理論値。
図中の数字はオフセット角を表わす。

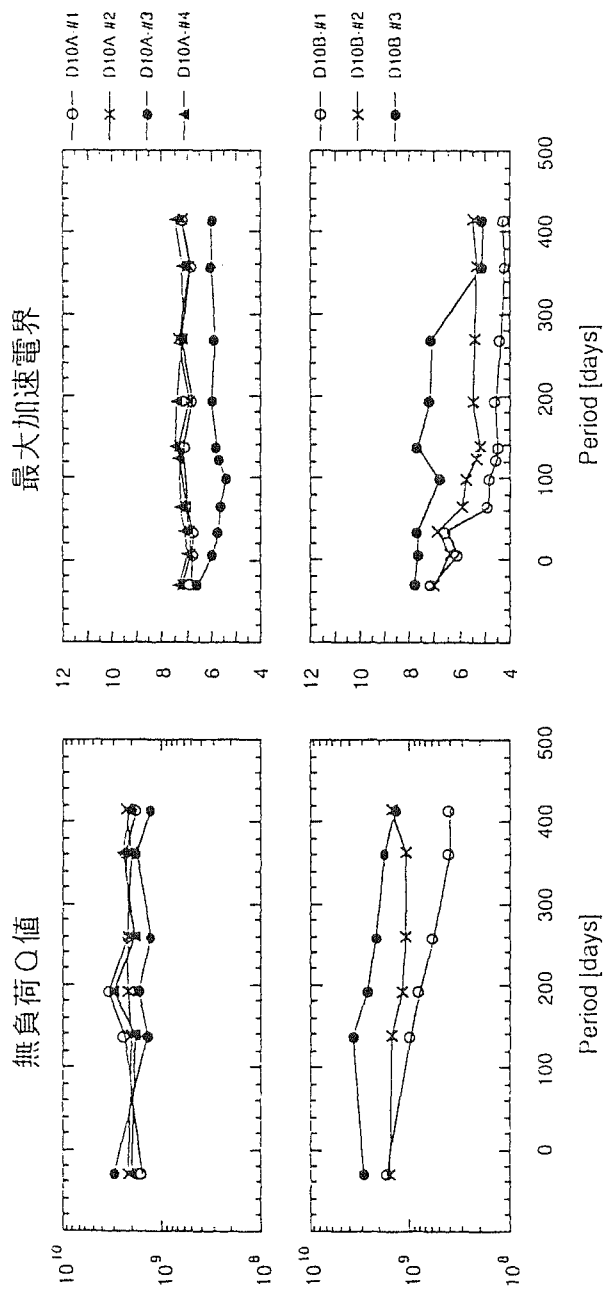


図4 長期運転における無負荷Q値と最大加速電界の経時変化。

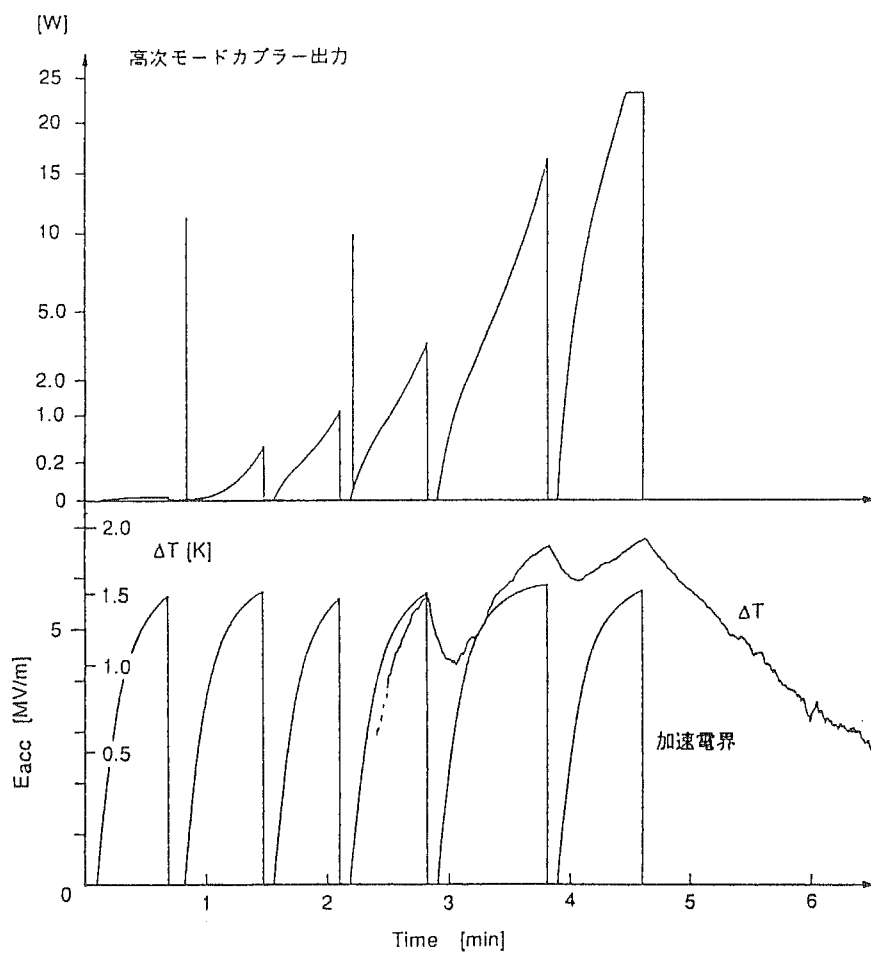


図5 高次モードカプラーの出力異常と温度上昇。
カプラーからの出力は加速モードである。

論文審査の結果の要旨

本論文は著者が高エネルギー物理学研究所 TRISTAN 計画，電子・陽電子衝突リングにおける超伝導加速空洞の応用・建設に参加し，空洞性能の測定，高周波制御の検討と実施，性能の長期安定性の研究を行なった成果をまとめたものである。

著者は空洞単体の性能試験を行なった結果，製作された32台の空洞のうち1台を除いて目標加速電界をはるかに越えている事を示した。また実装された最終状態における最大加速電界は単体性能に比べて約30%低下する事を見出し，その原因を検討した。

高周波制御に関しては，フェイザー図を用いて空洞電圧の外部高周波源によって励振される電圧とビーム誘起電圧の関係を超伝導空洞に対して検討した。その結果，問題点としてロビンソンの安定条件による蓄積電流値の制限とビーム入射時等の過渡状態における制御ループの負担の増大がある事を見出した。ロビンソンの安定条件による制限を調べるために著者は入射蓄積リングでビームテストを行ない，チューニング・アングル・オフセットをかける事が有効な事を発見し，最良のオフセット値を決定した。またオフセットをかける事によって，ビーム誘起電圧が小さくなり高周波制御が容易になる事も見出した。これらを検討し主リングの入射時，衝突時に夫々最適のオフセットをプログラム制御によってかけ，良好な結果を得た。また，ビーム負荷が大きいことから，空洞間の位相差によって電圧にアンバランスが生じることが見出され，精度の良い調整方法が示された。

主リングにおける超伝導空洞の性能の長期安定性については残留ガスの凝縮による原因が考えられる。著者は定期的に無負荷 Q 値と最大加速電界の測定を行ない誤差の範囲内で性能低下の無い事を結論した。また運転中に高次モードカプラーから出力しない筈の加速モードが出力される異常動作が発見された。著者はその原因を研究し，カプラーのフィルター内部でマルチパクティングが引き金になり超伝導破壊を起こしている可能性が高い事を結論した。

これらの研究と測定により TRISTAN に用いられた超伝導加速空洞の性能に関するデータとその最良の制御法が明らかとなり，TRISTAN のみならず将来のより発展した加速器計画に重要な資料と解析方法を与えるものである。

以上この論文は著者が自立して研究活動を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって鈴木敏司提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。